

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 51-37; 621.7.01

Нгуен З.К, Ефремов Д.Б.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПО СТЕПЕНЯМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ-ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ

**Аннотация.** Известно, что экспандирование является заключительной операцией на линиях производства труб большого диаметра (ТБД), оно применяется для исправления отклонений размеров и формы труб. Однако после экспандирования изделия часто имеют высокую неравномерность распределения напряжения-деформации по поперечным сечениям стенки, именно это может значительно снизить надежность, безопасность эксплуатации, а также ресурсы труб в суровых условиях. В настоящей работе проведена математическая связь степеней неравномерности напряжения-деформации с механическими свойствами материала труб (такими как модуль упругости, предел текучести, предел прочности и т.д.) и условием трения при экспандировании. На основе этой связи установлен метод математического моделирования на ЭВМ для оценки и классификации качества ТБД при механических свойствах материала и трении, считающихся случайными величинами в соответствии с заданными законами распределения. Результаты математического моделирования при изучении процесса экспандирования труб диаметром 1420 мм из стали класса прочности К60 показали, что при модуле упругости и пределе прочности, смещающихся в сторону больших величин, а пределе текучести, относительноном удлинении после разрыва и коэффициенте трения – в сторону меньших значений, равномерность распределения напряжения-деформации, а также качество ТБД повышены. Приведена классификация партии входных материалов и выбора смазки при экспандировании для получения высокого качества трубной продукции.

**Ключевые слова:** труба большого диаметра, экспандирование, неравномерность распределения, напряжение, деформация, математическое моделирование, случайная величина.

На сегодняшний день объемы производства труб большого диаметра в России составляют не менее 4,5–5,0 млн т в год благодаря современным способам формовки по схемам JCOE, UOE, а также формовкой вальцовкой на прессах и валковых листогибочных машинах (рис. 1). И в ближайшей, и в среднесрочной перспективе этот объем снижаться не будет. Системы трубопроводного транспорта, для сборки которых используются трубы большого диаметра, относятся к опасным техногенным объектам. Их аварии или отказы в работе приводят к возникновению серьезных угроз населению, инженерным сооружениям и природным массивам, поэтому к ним предъявляются высокие требования по обеспечению надежности и безопасности [1]. Надежность и безопасность эксплуатации современных магистральных трубопроводов обеспечивается не только высокими прочностными (стали К50, К52, К54, К55, К56, К58, К60 по ТУ 14-3-1573-96), вязкостными свойствами труб большого диаметра, но и их геометрическими размерами: отклонением наружного диаметра и овальности концов труб от круглой формы, отклонением от теоретической окружности в зоне сварного шва, кривизной труб и другими, которые определяются напряженно-деформированным состоянием (НДС) металла в процессе изготовления [2-5].

После операций формоизменения из стального листа труба сваривается внутренними и наружными швами. Операцию калибровки экспандированием применяют в качестве заключительной операции формования труб после сварки с продольным швом с целью выравнивания дефектов формы посредством радиального движения составного инструмента в ви-

де сегментов. В большинстве случаев используется экспандирование – пошаговая раздача трубы в требуемый размер с увеличением ее периметра на 0,8–1,5%. В процессе экспандирования высокие неравномерности распределения НДС на стенке, зависящие от механических свойств металла (модули упругости, предела текучести, прочности и т.д.) и условия трения процесса деформации, возможно возникать и влиять на качество, надежность и безопасность эксплуатации ТБД. Целью настоящей статьи является рассмотрение некоторых аспектов классификации групп и повышения качества ТБД после экспандирования по степеням неравномерности напряжения-деформации, считающихся дополнительными показателями качества, а также оценка влияния распределения механических свойств исходного металла и коэффициента трения на качество трубных изделий.



Рис. 1. Технологические операции при производстве прямошовных сварных труб большого диаметра по различным схемам формовки

Методика исследования работы представляет собой установление математической связи степеней неравномерности напряжения-деформации с механическими свойствами трубной заготовки и трением при экспандировании и применение случайного моделирования для классификации и оценки качества ТБД по дополнительным показателям.

**Степени неравномерности напряжения-деформации при экспандировании и методика классификации и оценки качества ТБД**

Степени неравномерности напряжения  $k_\sigma$  и деформации  $k_\varepsilon$  определяются как отношение максимальных значений напряжения  $\sigma_{max}$  и деформации  $\varepsilon_{max}$  от минимальных  $\sigma_{min}$  и  $\varepsilon_{min}$  соответственно, т.е.  $k_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$  и  $k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}}$ . Чем ближе значения

этих критериев к единице, тем более равномерным является распределение НДС по контуру трубы и тем больше возможность использования операции экспандирования для калибровки трубной заготовки по всему её контуру. Чем коэффициент неравномерности напряжения  $k_\sigma$  больше, тем равномерность распределения остаточных напряжений меньше, т.е. при эксплуатации в агрессивных средах, особенно в коррозионных как море, ТБД будут малостойкими; надежность и безопасность систем труб также значительно снизятся. Чем степень неравномерности деформации  $k_\varepsilon$  больше, тем возможность совершенствования геометрического качества ТБД меньше. Поэтому с целью повышения качества трубных изделий нужно снизить степени неравномерности напряжения и деформации до минимально возможного уровня. Уровень качества ТБД классифицирован по группам, показанным в табл. 1, где  $[k_\sigma]$  и  $[k_\varepsilon]$  (оба всегда не меньше 1) соответственно пределы степеней неравномерности напряжения и деформации, определенные при реальном обследовании качества ТБД. При  $k_\sigma \leq [k_\sigma]$  механическое качество продукции хорошее (равномерность распределения остаточных напряжений высока, надежность и безопасность эксплуатации труб будут высокими), при  $k_\varepsilon \leq [k_\varepsilon]$  геометрическое качество продукции хорошее (см. табл. 1).

Уровень качества ТБД по степеням неравномерности напряжения-деформации

Номер группы	$k_\sigma$	$k_\varepsilon$	Качество продукции	
			Механическое	Геометрическое
1	Не более $[k_\sigma]$	Не более $[k_\varepsilon]$	Хорошее	Хорошее
2	Не более $[k_\sigma]$	Более $[k_\varepsilon]$	Хорошее	Плохое
3	Более $[k_\sigma]$	Не более $[k_\varepsilon]$	Плохое	Хорошее
4	Более $[k_\sigma]$	Более $[k_\varepsilon]$	Плохое	Плохое

Из решения системы дифференциальных уравнений равновесия деформируемого тела совместно с условием пластичности металла, установленной математическим описанием эпюр НДС трубы по всему периметру, учитывая наличие зазоров между сегментами при экспандировании, найдены зависимости степеней неравномерности напряжения-деформации на стенке от механических свойств материала, условия трения и других параметров процесса, они выражаются следующими формулами:

$$\begin{cases} k_\sigma = e^{\mu\beta}; \\ k_\varepsilon = e^{\gamma} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между сегментами экспандера и внутренней поверхностью трубной заготовки; величины  $\beta$  (в радианах) и  $\gamma$  определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \cos \beta = \frac{u + R_1 + R_2 (\cos \frac{\alpha}{2} - 1)}{\sqrt{(u + R_1 - R_2)^2 + R_2^2 + 2(u + R_1 - R_2)R_2 \cos \frac{\alpha}{2}}}, \\ \gamma = \frac{\ln \sigma_b - \ln \sigma_{0,2}}{\ln(\frac{\delta_s}{100} - \frac{\sigma_b}{E}) - \ln 0,002}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_1$  – внутренний радиус трубной заготовки, мм;  $R_2$  – радиус описанной окружности сегментов экспандера, мм;  $u$  – рабочий ход сегментов, мм;  $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{n}$  – угол между центральными линиями сегмента и зазора;  $n$  – число сегментов;  $E$  – модуль упругости,

МПа;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести, МПа;  $\sigma_b$  – предел прочности, МПа;  $\delta_5$  – относительное удлинение после разрыва, %. Материал для производства ТБД должен обеспечивать по ТУ 14-3-1573-96, что  $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} \leq 0,9$ .

Степени неравномерности напряжения  $k_\sigma$  и деформации  $k_\epsilon$  представляют собой функции от совокупности аргументов  $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$ . При обследовании партии исходных материалов трубной заготовки, включающей  $N$  продукций перед производством в определенных условиях технологии, видно, что значения фактических параметров совокупности  $M$  при изготовлении подчиняются определенным закономерностям [6-9]. В общем случае вид и характер распределения случайных величин может быть различным. Однако для разработки метода математического моделирования это не имеет значения. Принципиальной является лишь объективность существования этих закономерностей в реальных производственных условиях. Вид распределения, являющийся непрерывным, нормальным, треугольным (Симпсона) зависит от конкретных технологических условий. Кроме рассмотренных числовых характеристик распределений, важное значение имеет коэффициент относительной асимметрии  $\lambda$ , который определяет смещение действительного центра группирования каждого исходных параметров  $\omega$  от математического ожидания  $\omega_0$  (рис. 2). Это связано с тем, что их действительные законы распределения, как правило, несимметричны, и в производственных условиях коэффициент  $\lambda$  может изменяться в пределах  $[-0,5...+0,5]$  [9]. Блок-схемой алгоритма определения распределения степеней неравномерности напряжения-деформации  $k_\sigma, k_\epsilon$  при экспандировании (рис. 3) предложен метод математического моделирования случайных параметров на ЭВМ, где случайными величинами будут 5 параметров совокупности  $M$  с их интервалами:  $E = \bar{E} \pm \Delta E$ ;  $\sigma_{0,2} = \bar{\sigma}_{0,2} \pm \Delta \sigma_{0,2}$ ;  $\sigma_b = \bar{\sigma}_b \pm \Delta \sigma_b$ ;  $\delta_5 = \bar{\delta}_5 \pm \Delta \delta_5$  и  $\mu = \bar{\mu} \pm \Delta \mu$ , с их законами распределения и с их совокупностью коэффициентов относительной асимметрии  $\lambda = (\lambda_E, \lambda_{\sigma_{0,2}}, \lambda_{\sigma_b}, \lambda_{\delta_5}, \lambda_\mu)$ . После моделирования качество ТБД классифицировано по группам (см. табл. 1).

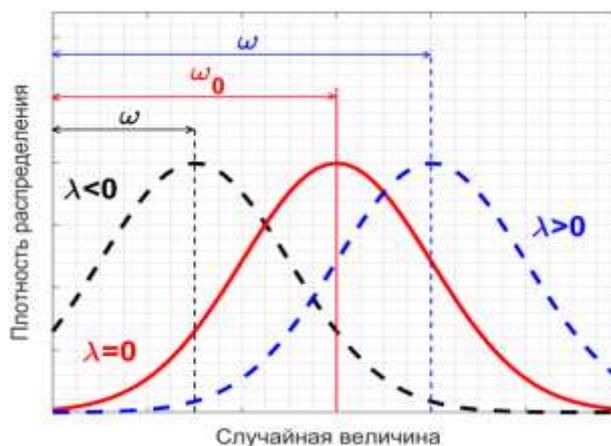


Рис. 2. Описание коэффициента относительной асимметрии

Кроме того, для количественной оценки существования связи между изучаемыми совокупностями случайных величин используется специальный статистический показатель – коэффициент корреляции  $r$ , это безразмерная величина, она может определяться нулю-величиной коэффициента относительно асимметрии и меняться от 0 до  $\pm 1$ . Чем ближе значение коэффициента к единице (неважно с каким знаком), тем с большей уверенностью можно утверждать, что между двумя рассматриваемыми совокупностями переменных существует линейная связь. Если окажется, что  $r = \pm 1$ , то имеет место классический случай чисто функциональной зависимости (т.е. реализуется идеальная взаимосвязь). Зная коэффициент корреляции, можно дать качественно-количественную оценку тесноты связи. Характеристика силы связи по шкале Чеддока при величине коэффициента парной корреляции  $r$  следующая: до 0,3 – очень слабая; 0,3–0,5 – слабая; 0,5–0,7 – заметная; 0,7–0,9 – сильная и 0,9–0,99 – очень сильная [10]. Здесь будет рассмотрена зависимость степеней неравномерности напряжения-деформации ( $k_\sigma, k_\epsilon$ ) от исходных параметров  $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$ . Коэффициенты корреляции степеней неравномерности напряжения  $r_{\sigma p}$  и деформации  $r_{\epsilon p}$  определяются формулой (3), где  $p$  может быть компонентами совокупности  $M$ :

$$\left\{ \begin{aligned} r_{\sigma p} &= \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} p_i - \left( \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right) \left( \sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[ N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i}^2 - \left( \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]} \\ r_{\epsilon p} &= \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} p_i - \left( \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} \right) \left( \sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[ N \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i}^2 - \left( \sum_{i=1}^N k_{\epsilon i} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

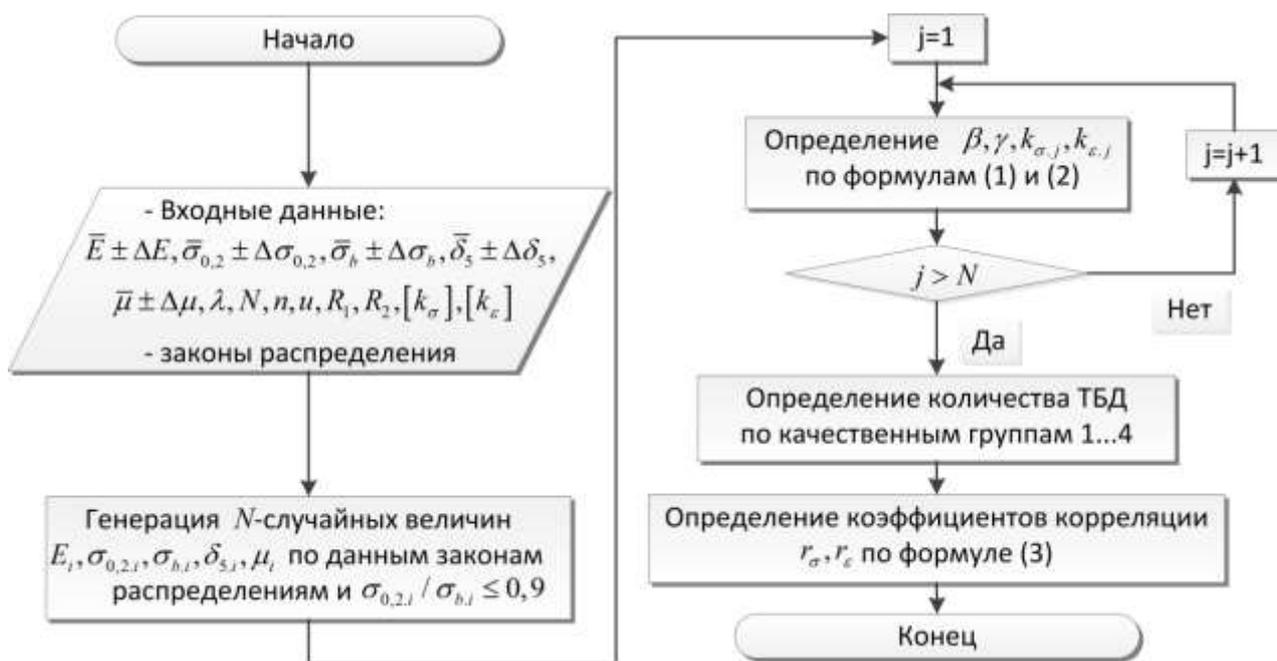


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения распределения степеней неравномерности напряжения и деформации

Таблица 2

Случайные параметры для моделирования

Коэффициенты корреляции  $r_{\sigma p}$  и  $r_{\epsilon p}$  отображают влияние модуля упругости, предела текучести, предела прочности, относительного удлинения после разрыва и коэффициента трения на степени неравномерности напряжения-деформации и на качество ТБД. Это основание технологических рекомендаций о контроле исходных материалов необходимо с целью получения хорошего качества труб после экспандирования. Проблемы методики будут рассмотрены ниже.

**Пример работы и обсуждение**

В качестве примера рассмотрены трубы с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 30мм ( $R_1 = 680$  мм) из стали марки 10Г2ФБЮ класса прочности К60 по ТУ 14-3-1573. Экспандер с радиусом описанной окружности сегментов  $R_2 = 666$  мм, рабочим ходом сегментов  $u = 20$  мм и числом сегментов  $n = 12$ . Стохастическое изменение механических свойств для партии стали К60 и коэффициента трения сегментов с внутренней поверхностью трубной заготовки, для рального процесса производства представлено в табл. 2. Пределы классификации качества ТБД:  $[k_\sigma] = 1,07$  и  $[k_\epsilon] = 20$ .

Обозначение параметров	Интервал величины	Закон распределения	Коэффициент $\lambda$	
			$\lambda_1$	$\lambda_2$
$E$ [ГПа]	$210 \pm 5$	Симпсона	0	0,12
$\sigma_{0,2}$ [МПа]	$519 \pm 59$	Нормальный	0	-0,15
$\sigma_b$ [МПа]	$649 \pm 59$	Нормальный	0	0,30
$\delta_5$ [%]	$20 \pm 1$	Непрерывный	0	-0,20
$\mu$ [-]	$0,27 \pm 0,10$	Нормальный	0	-0,35

При рассмотрении партии ТБД после экспандирования, состоящей из 10000 листов класса прочности К60, распределение исходных данных представлено на рис. 4, При этом, генерация случайных совокупностей аргументов  $M(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$  с разными совокупностями коэффициента асимметрии (табл. 2), составляла  $N = 10000$ . При  $\lambda = \lambda_1$  исходные параметры распределены в основном симметрично (рис. 4, а), причем при  $\lambda = \lambda_2$  значения модуля упругости  $E$  и предела прочности  $\sigma_b$  смещаются в сторону больших величин, а предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительного удлинения после разрыва  $\delta_5$  и коэффициента трения  $\mu$  – в сторону меньших значений. Математическое моделирование было сделано с помощью про-

граммы на языке MATLAB на ЭВМ по алгоритму на рис. 3.

Распределение степеней неравномерности напряжения-деформации  $k_\sigma, k_\epsilon$  после моделирования показано на рис. 5 и в табл. 3. Когда значения входных параметров сконцентрировано в основном в центральном диапазоне ( $\lambda = \lambda_1$ ), число изделий группы 1 (группа хорошего качества) составляет около 52%, групп 2, 3, 4 (группы плохого качества) – около 48%

(рис. 5, а), из них наихудшая группа (группа 4) – только 0,22%. Одна партия продукции считается хорошей, если количество некачественных изделий составляет менее 20% от общего всей партии. Таким образом, с симметричным распределением механических свойств материала и коэффициента трения полученная партия ТБД после экспандирования не соответствует требованиям заданного качества.

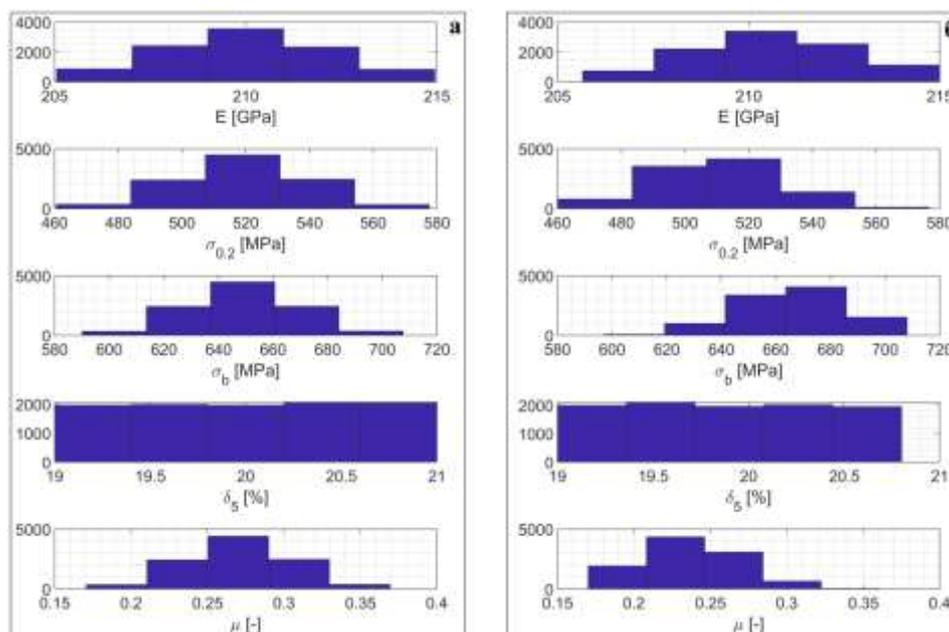


Рис. 4. Распределение для 10000 совокупностей исходных параметров по заданным законам распределения: а – при  $\lambda = \lambda_1$ ; б – при  $\lambda = \lambda_2$

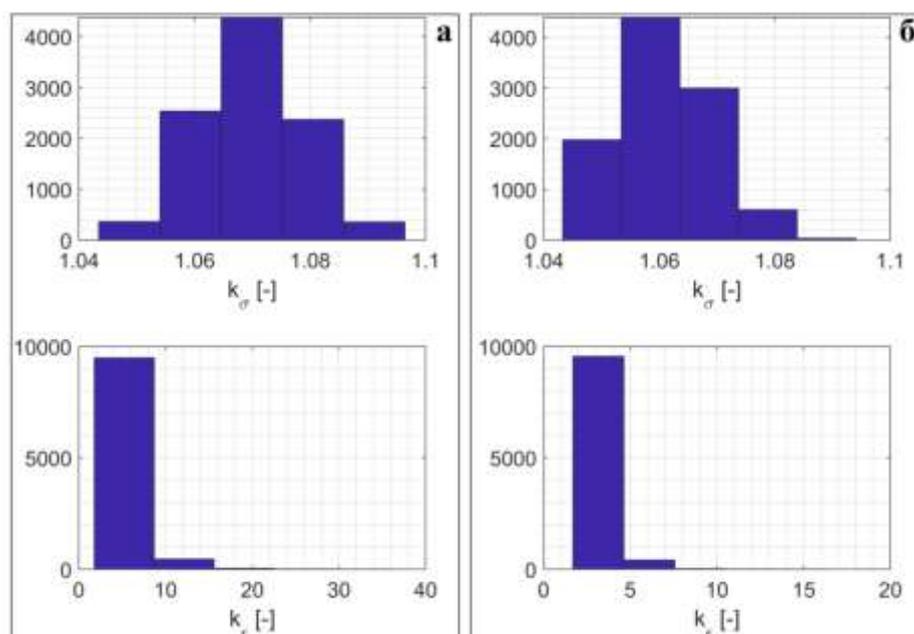


Рис. 5. Распределение степеней неравномерности напряжения и деформации: а – при  $\lambda = \lambda_1$ ; б – при  $\lambda = \lambda_2$

При асимметричном распределении ( $\lambda = \lambda_2$ ) со стороны меньших значений  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ,  $\mu$  и больших  $E$ ,  $\sigma_b$  число деталей группы хорошего качества 1 составляет около 86%, групп плохого качества 2, 3, 4 только около 14% (рис. 5, б). Заданная партия ТБД считается соответствующей требуемому качеству.

Из табл. 3 видно, что с положительными коэффициентами корреляции трение значительно снижает механическое качество и существенно влияет на геометрию труб после экспандирования. При значительном воздействии трения на ТБД механико-геометрическое качество их будет ниже. Поэтому на производстве можно контролировать трение на низком уровне специальными смазочными материалами, чтобы улучшить качество трубной продукции.

Таблица 3

Моделирование оценки качества ТБД при  $N = 10000$

I. Степени неравномерности напряжения-деформации				
Номер группы	$k_\sigma$	$k_\epsilon$	Количество деталей при	
			$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = \lambda_2$
1	Не более 1,07	Не более 20	5159	8638
2	Не более 1,07	Более 20	0	0
3	Более 1,07	Не более 20	4819	1362
4	Более 1,07	Более 20	22	0
II. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности				
Параметр $P$	Напряжения $r_{\sigma p}$		Деформации $r_{\epsilon p}$	
	Величина	Оценка	Величина	Оценка
$E$	0	-	-0,0180	Очень слабая
$\sigma_{0,2}$	0	-	0,5594	Заметная
$\sigma_b$	0	-	-0,4542	Слабая
$\delta_5$	0	-	0,0227	Очень слабая
$\mu$	1	Идеальная взаимосвязь	0,3789	Слабая

Также из табл. 3 видно, что предел текучести и прочности значительно влияют на степень неравномерности деформации, с увеличением предела текучести и уменьшением предела прочности величина степени  $k_\epsilon$  увеличивается, т.е. геометрическое качество ТБД снижается. А модуль упругости и относительное удлинение после разрыва незначительно влияют на степень неравномерности деформации, однако увеличение величины  $E$  и уменьшение значения  $\delta_5$  вызывают уменьшение коэффициента  $k_\epsilon$ , т.е. гео-

метрическое качество ТБД повышается.

### Заключение

Установлена взаимосвязь степеней неравномерности напряжения и деформации при экспандировании с механическими свойствами входного материала и трением сопрягаемых поверхностей сегментов с трубной заготовкой, которая позволяет сделать классификацию качества ТБД при заданном допустимом значении уровня качества. Наилучшее качество ТБД обеспечивается при степенях неравномерности напряжения-деформации близких к единице.

Для оценки эффективности метода достижения высокого качества трубной продукции разработан алгоритм моделирования на ЭВМ, учитывающий вероятностный характер механических свойств материала и условие влияния трения на процесс деформации при экспандировании. Указанный математический метод позволяет прогнозировать качество выпускаемой партии трубной продукции. Для повышения механических и геометрических параметров качества партии ТБД после экспандирования, нужно классифицировать механические свойства по отклонениям распределения предела текучести и относительного удлинения после разрыва в сторону меньших значений, а модули упругости и предела прочности - в сторону больших, а также нужно обеспечивать соответствующие условия трения в процессе экспандирования.

### Список литературы

1. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Галимов М.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния металла на основе математического моделирования при производстве труб большого диаметра // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 706-712.
2. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
3. Katsumi M., Kenji O. Steel Products for Energy Industries. JFE Technical Report. 2013. Vol. 43. No. 18. P. 1-11.
4. Звонарев Д.Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ. 2015. 166 с.
5. Галкин В.В., Чебурков А.С., Пачурин Г.В. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 114-115.
6. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1969. 467 с.
7. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и взаимозаменяемость. Кн. 3. Взаимозаменяемость. Ч. 1. М.: МГТУ, 2000. 240 с.

8. Тимирязев В.А., Кутин А.А., Схиртладзе А.Г. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2011. 393 с.
9. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. СПб.: Лань, 2016. 512 с.
10. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 103 с.

#### Сведения об авторах

**Нгуен Зуй Кыонг** – аспирант кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: tuoitre.hvktqs@gmail.com

**Ефремов Дмитрий Борисович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: defremov@list.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### MATHEMATICAL SIMULATION FOR QUALITY CLASSIFICATIONS OF LARGE DIAMETER PIPES BY THE DEGREES OF UNEVEN DISTRIBUTION OF STRESS-STRAIN DURING EXPANDING

**Nguyen Duy Cuong** – graduate student of Department of Metal Forming, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia. E-mail: tuoitre.hvktqs@gmail.com.

**Efremov Dmitry B.** – Ph.D. (Eng.), Associate professor, Department of Metal Forming, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia. E-mail: defremov@list.ru.

**Abstract:** It is known that expansion is the final operation on the production lines of large diameter pipes (LDP), it is used to correct deviations in the size and shape of pipes. However, after expansion, products often have a high uneven distribution of the stressed-strain over the cross sections of their wall, and this can significantly reduce the reliability, safety of operation and also pipe resources in harsh conditions. In the present work, a mathematical dependence is made between the degrees of stress-strain non-uniformity with the mechanical properties of the pipe material (such as elastic modulus, yield strength, tensile strength, ...) and the friction condition during expansion. On the basis of this dependence, a method of mathematical simulation on a computer has been established for evaluating and classifying the quality of LDP with the mechanical properties of the material and friction friction, which are considered random variables in accordance with the given distribution laws. The results of mathematical simulation when studying the process of expanding pipes with a diameter of 1420 mm made of K60 steel showed that: with the elastic modulus and tensile strength shifting toward large values, and the yield strength, elongation after break and friction coefficient - towards lower values, the uniformity of the stress distribution deformation and also the quality of the LDP is improved, and the possibilities of classifying a batch of input materials and the choice of lubricant during expansion are given to obtain high quality pipe products.

**Keywords:** large diameter pipe, expansion, uneven distribution, stress, strain, mathematical simulation, random variable.

---

Ссылка на статью:

Нгуен З.К., Ефремов Д.Б. Математическое моделирование для классификации качества труб большого диаметра по степеням неравномерности распределения напряжения-деформации при экспандировании // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 14-20.

Nguyen Duy Cuong, Efremov D.B. Mathematical simulation for quality classifications of large diameter pipes by the degrees of uneven distribution of stress-strain during expanding. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 14-20.